



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**PŘEPLŇOVÁNÍ TURBODMYCHADLY S PODPOROU
ELEKTROMOTORŮ**

TURBOCHARGER BOOSTING WITH ELECTRIC SUPPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Rafaj

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Martin Rafaj**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přepřínování turbodmychadly s podporou elektromotorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou přepřínování spalovacích motorů hybridními turbodmychadly využívající elektrické podpory nebo přímého elektrického pohonu kompresoru. V rámci práce se předpokládá analýza různých existujících nebo v blízké budoucnosti potenciálních hybridních systémů z hlediska jejich přínosů a nevýhod v oblasti pohonných jednotek osobních automobilů. Hlavní důraz při analýze je kladen na celkovou účinnost hybridního systému. Součástí práce je analýza budoucího vývoje v dané oblasti.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše existujících systémů přepřínování se zapojením elektrických motorů.

Analýza parametrů existujících systémů.

Analýza budoucího vývoje systémů přepřínování se zapojením elektrických motorů.

Seznam doporučené literatury:

NGUYEN-SCHÄFER, Hung. Rotordynamics of Automotive Turbochargers. Second Edition. Ludwigsburg, Germany: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-17643-7.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. ISBN 1-56091-734-2.

NASAR, S. A. Handbook of electric machines. New York: McGraw-Hill, 1987. ISBN 007045888X.

TIMAR, P. L. Noise and Vibration of Electrical Machines. Budapest: Akademiai Kiadó, 1989.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto rešeršná bakalárska práca sa zaoberá problematikou preplňovania pri využívaní elektrickej podpory turbodúchadiel. Existuje viacero typov použitia elektrickej podpory a práca je zameraná na porovnanie ich prínosov či nevýhod v reálnom svete. Takisto je spomenutá časť spojená s účinnosťou hybridného pohonu, dnešných a v blízkej dobe predpokladaných trendov využívania tejto technológie.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

turbodúchadlo, elektrická podpora, preplňovanie, účinnosť, spaľovací motor, elektromotor

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the issue of turbocharging with electrical support. There are several types of use of electrical support and work is aimed at comparing their benefits and disadvantages in the real world. Also mentioned is the part associated with the efficiency of the hybrid drive, today and in the near future anticipated trends in the use of this technology.

KEYWORDS

turbocharger, electrical support, turbocharging, efficiency, combustion engine, electric motor

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

RAFAJ, Martin. *Přepřínování turbodmychadly s podporou elektromotorů* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117404>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Novotný.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 25. mája 2019

.....

Martin Rafaj

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu práce doc. Ing. Pavelovi Novotnému, Ph.D. za jeho odborné vedenie, rady a ochotu počas písania tejto bakalárskej práce.

1 OBSAH

| | |
|--|----|
| Úvod | 9 |
| 1 História turbodúchadiel | 10 |
| 2 Turbodúchadlá všeobecne | 11 |
| 2.1 Popis, princíp činnosti..... | 11 |
| 2.2 Celková účinnosť | 12 |
| 2.3 Turboefekt..... | 13 |
| 3 Turbodúchadlá s elektrickou podporou | 16 |
| 3.1 Kompresor poháňaný elektromotorom | 16 |
| 3.1.1 Systém podpory turbodúchadla elektrokompresorom od Audi..... | 16 |
| 3.1.2 Systém Volvo Power Pulse..... | 20 |
| 3.1.3 eBooster | 22 |
| 3.2 Elektromotor osadený v turbodúchadle | 25 |
| 3.3 Turbo compounding..... | 28 |
| Záver..... | 31 |
| Zoznam použitých skratiek a symbolov | 37 |

ÚVOD

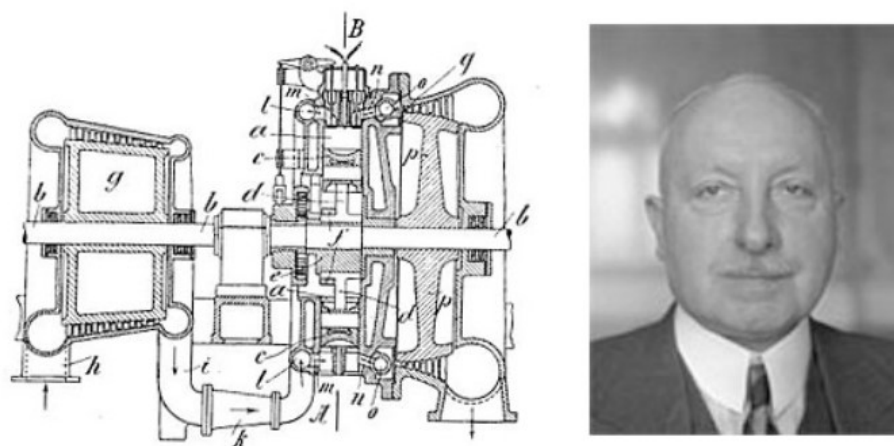
Keď sa povie slovo turbodúchadlo, väčšina si predstaví agregát automobilu z vyššej motorovej triedy – typicky drahší model auta. To už ale dnes nie je vždy pravdou. Dnes sa turbodúchadlá montujú aj do tých najnižších a najzákladnejších rád automobilových agregátov. Častokrát výrobca motor bez tejto súčasti ani neponúka. Kým v roku 2010 bolo na českých cestách len každé štvrté auto vybavené turbodúchadlom, v roku 2015 to už boli 2/3 áut [1]. Tu je vidieť, akým rýchlym rastom sa táto technológia dnes uchytila.

Môže za to niekoľko faktorov. Asi najpodstatnejší je požadované zvýšenie výkonu vozidla pri čo najmenšej spotrebe paliva a produkcii škodlivých spalín, ktorú práve táto technológia sľubuje. Vývoj áut neustále napreduje a každý výrobca chce mať výkonnejší, spoľahlivejší a úspornejší motor oproti konkurencii. Aj keď dnes je už konkurencia pre spaľovacie motory väčšia ako v minulosti, stále majú bežné spaľovacie motory obrovské percento zastúpenia na trhu oproti elektromobilom, či autám na vodík. Aj pre túto skutočnosť je možné predpokladať, že vývoj spaľovacích agregátov a s ním aj vývoj turbodúchadiel len tak rýchlo nezanikne.

V posledných rokoch sa však začali objavovať už aj tzv. e-charge či hybridné turbodúchadlá. Sú to klasické turbodúchadlá doplnené o určitý typ elektrickej podpory chodu. Hlavná myšlienka je zvýšiť rýchlosť plnenia stláčaného plynu v nízkych otáčkach roztočením kompresorovej turbíny elektromotorom. Typov použitia elektrickej podpory je však viacero, takisto ako aj ich využitia. Niektoré vybrané riešenia sú popísané v tejto práci.

1 HISTÓRIA TURBODÚCHADIEL

Pre dosiahnutie vyššieho výkonu motora je potrebné väčšie množstvo zápalnej zmesi a vzduchu. A keďže nie je možné donekonečna zväčšovať objem valcov a ich počet, je potreba zmes dostať do valca pod väčším tlakom. To si uvedomoval už koncom 19.storočia pán Gottlieb Daimler, ktorý si nechal patentovať v roku 1885 techniku predstlačenia nasávaného vzduchu do motora s vnútorným spaľovaním, aj keď jeho vynález mal ešte ďaleko od podoby dnešného turbodúchadla. Jednalo sa o čerpadlo poháňané ozubeným kolesom, ktoré stlačovalo vzduch do motora na tlak vyšší než atmosférický. Turbodúchadlo si v roku 1905 nechal patentovať švajčiarsky inžinier Alfred Büchi. Tu už sa jednalo o kompresor spriahnutý s turbínou na spoločnej hriadeľi, poháňanou prúdiacimi výfukovými plynmi, čo je princíp, ktorý je zachovaný dodnes. Jednalo sa ale len o model a trvalo niekoľko ďalších rokov kým sa táto myšlienka naplno uskutočnila a preniesla na sériové použitie [2].



Obr.1 Nákres prvého turbodúchadla (vľavo); Alfred Büchi (vpravo) [3]

Rozmach preplňovania začal počas prvej svetovej vojny, kedy sa turbodúchadlá montovali do bojových lietadiel, pretože v prevádzkovej výške lietadla je atmosférický tlak vzduchu nižší a má menšiu hustotu. A to až tak, že napríklad vo výške približne 5500 m.n.m má vzduch približne 50% tlaku ako pri hladine mora, a preto preplňovanie bola jediná cesta ako udržať relatívne vysoký výkon aj vo veľkých nadmorských výškach.

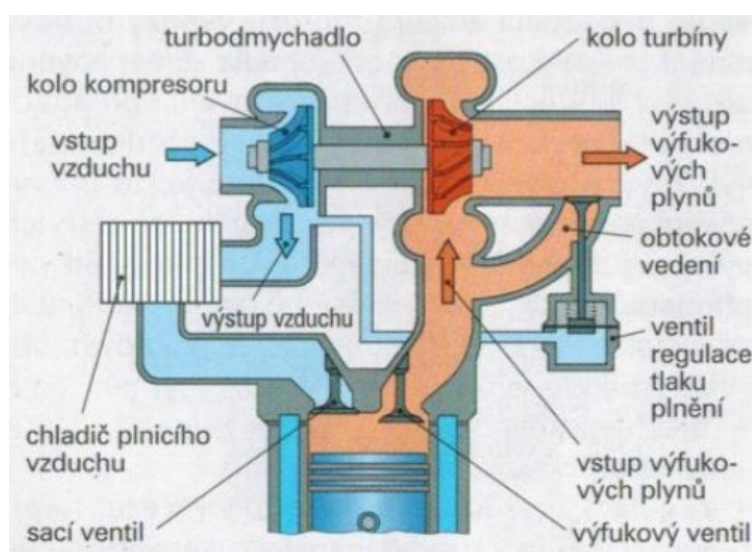
Sériová montáž do osobných automobilov prepukla v 50. a 60. rokoch 20. storočia. Dôvod investovania automobiliek do ďalšieho vývoja bol jednoduchý – rovnaký výkon motora bolo možné dosiahnuť pri menších rozmeroch motora, čím sa ušetril materiál a v neposlednej rade cena nákladov na výrobu vozidla.

2 TURBODÚCHADLÁ VŠEOBECNE

Turbodúchadlo ako tepelný stroj pracuje s inak nevyužitou energiou prúdiacich horúcich výfukových plynov vychádzajúcich z motora. Jeho konštrukcia a súčasti musia byť usporiadané na teploty, tlak, vibrácie a ostatné okolnosti spaľovacieho procesu.

2.1 POPIS, PRINCÍP ČINNOSTI

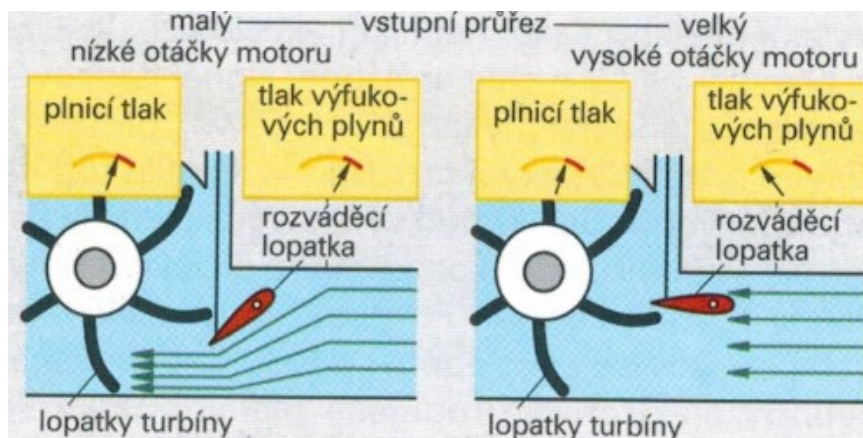
Turbodúchadlo je zariadenie s minimálne dvoma rotormi osadenými na spoločnej hriadeľi. Prvá časť je turbínová, skladá sa z komory turbíny a rotora. Druhá časť je kompresorová, zložená obdobne z komory kompresoru a rotora. Výfukové plyny zo spaľovacieho priestoru sú po výfukovom cykle nasmerované potrubím do priestoru turbínovej komory na rotor. Vplyvom prúdenia sa rotor otáča a tým roztáča aj kompresorový rotor na druhej strane spoločného hriadeľa.



Obr.2 Popis činnosti motora s turbodúchadlom [4]

Celkovo turbodúchadlo slúži na stlačenie vzduchu, ktorý sa vháňa do spaľovacieho priestoru. Čím viac vzduchu obsahuje zmes, tým viac paliva sa môže dodať do valca, čo vyústi v silnejšie horenie a tým aj v konečnom dôsledku potencióálne vyšší výkon. Viac kyslíka taktiež zabezpečí dokonalejšie spaľovanie pre potrebu čo najväčšieho zníženia produkcie škodlivých emisií. Pretože sa ale vzduch stláčaním zahrieva (pri konvenčných agregátoch používaných v automobiloch až na cca 180°C) a horúci vzduch má nižšiu hustotu, ochladzuje sa v medzichladiči. Vyššia hustota vzduchu umožňuje použitie väčšieho množstva paliva [4].

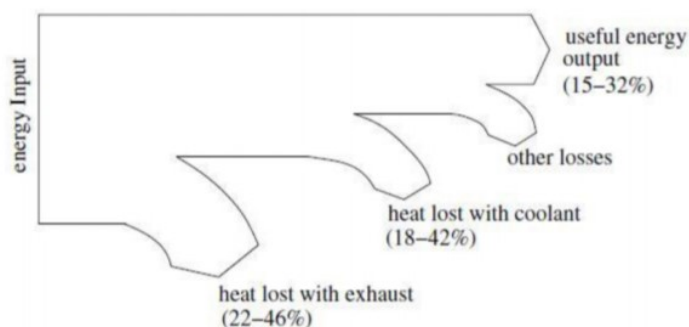
Pretože je turbodúchadlo v automobiloch navrhnuté tak, aby bolo účinné už od nižších či stredných otáčok motora, musí sa v oblasti vysokých otáčok regulovať tlak v turbíne, aby nedošlo k prekročeniu hodnôt tlaku a následne k poškodeniu či deštrukcii. Regulácia tlaku turbodúchadla sa môže uskutočňovať napríklad mechanicko-pneumatickou reguláciou, elektronickou reguláciou alebo zmenou prietokového prierezu turbíny (zmenou geometrie lopatiek alebo sústredením prúdu plynov na určitú oblasť rotora). Regulácia nie je nutná napríklad pri preplňovaných motoroch so stacionárnym chodom, kde sa otáčky nemenia a tým pádom tlak ostáva počas celého chodu rovnaký.



Obr.3 Zmena smeru prúdenia plynov na rotor turbíny [4]

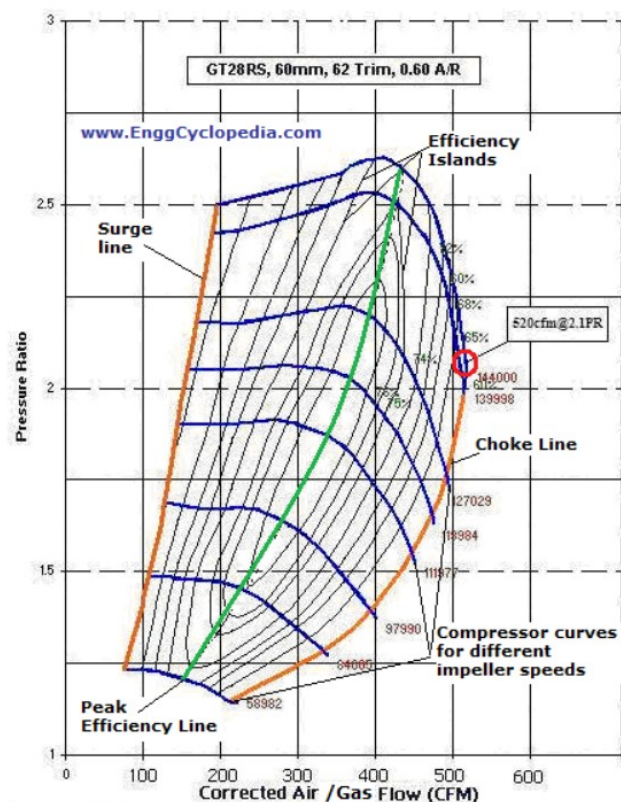
2.2 CELKOVÁ ÚČINNOSŤ

Približne 22–46% energie z paliva spaľovacích motorov je nevyužitá a odchádza výfukom [5]. Preto sa čoraz viac kladie dôraz na využitie tejto inak nevyužitej energie, či už pre zvýšenie účinnosti agregátu ako jednotky, alebo pre úsporu pohonných hmôt či zníženie produkcie emisií.



Obr.4 Znázornenie potenciálnej energie motora [6]

Energia výfukových plynov sa ďalej delí na termálnu a kinetickú. Kinetickú je možné zachytiť napríklad práve turbodúchadlom alebo pomocou rekuperačných členov vo výfukovom systéme. Tie môžu energiu dodávať späť do motora buď mechanicky, alebo pomocou elektrickej energie. Termálnu energiu je možné znova využiť napríklad pomocou rankinovho cyklu či termoelektrických generátorov. Treba ale podotknúť, že každé ďalšie prídavné zariadenie bude mať nejakú svoju špecifickú účinnosť a nakoľko perpetuum mobile neexistuje, bude vždy menšia ako 100%.

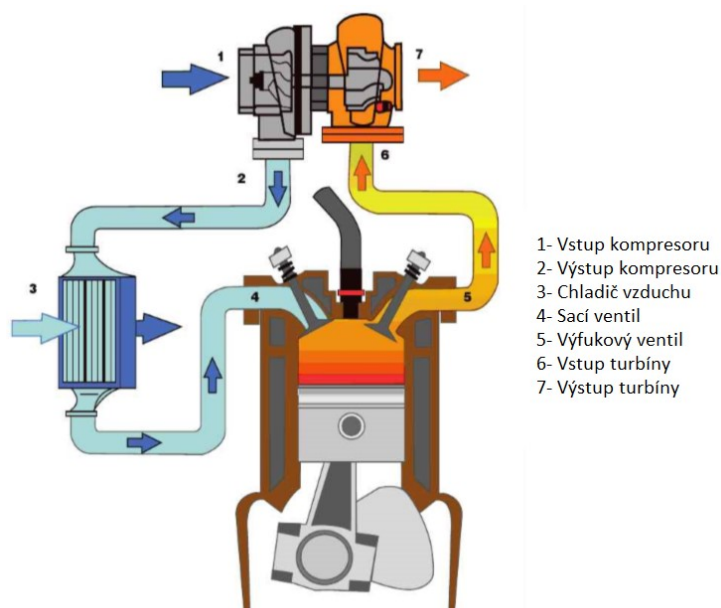


Obr.5 Kompresorová mapa [7]

Pri účinnosti turbodúchadiel sa zväčša udáva účinnosť kompresoru, ktorú vyjadruje tzv. kompresorová mapa. Najvyššia účinnosť sa pohybuje okolo 75-80%. Účinnosť ale nie je po celú dobu chodu turbodúchadla rovnaká. Závisí od rôznych faktorov, ktoré je možné vidieť na Obr.5 – zobrazuje kompresorovú mapu turbodúchadla Garrett GT28RS [7].

2.3 TURBOEFEKT

Turboefekt – popísaný ako omeškanie turbodúchadla – je jednoducho povedané doba, ktorá ubehne od zošliapnutia plynového pedálu vo vozidle k dostatočnému roztočeniu turbíny turbodúchadla. Tento neželaný efekt je jednou z najdiskutovanejších tém v oblasti preplňovania motorov, pretože v dnešných autách je často pozorovateľný aj laikom.



Obr. 6 Schéma preplňovania turbodúchadlom [8]

Omeškanie je spojené s potrebným rastom otáčok motora a tým pádom aj vyššej rýchlosti výfukových plynov. Tie roztáčajú turbínové koleso turbodúchadla. Je zrejmé, že ako rastú otáčky motora, rastie aj množstvo výfukových plynov a tým pádom sa aj turbína točí rýchlejšie. Následkom je vyšší plniaci tlak do priestoru motora a takto to ide dokola. Je možné povedať, že čím väčšie turbodúchadlo – tzn. väčší priemer rotora – tým viac energie treba na jeho roztočenie, ale zároveň vie dodať väčší objem vzduchu za jednotku času oproti menšiemu turbodúchadlu. Keby sa na relatívne malý motor (1.5l) umiestnilo veľké turbodúchadlo, jeho výkon by bol enormný. Táto taktika sa dokonca uplatňovala v 80. rokoch u Formule 1. Ako prvý prišiel s touto myšlienkou Renault, ktorý dokázal z vidlicového šesťvalca o objeme spomínaných 1,5 litra získať závratných 970kW [9]. To ale znamenalo, že turbodúchadlo samotné bolo skoro tak veľké ako motor. Pri takejto konfigurácii je ale jasné, že oneskorenie turbodúchadla bude značné. Až tak, že v otáčkach do cca 4000min^{-1} má motor výkon porovnateľný – ak nie nižší – s takou istou objemovou triedou bez preplňovania. Až keď sa turbodúchadlo roztočí na požadované otáčky, začne preplňovanie a tým v konečnom dôsledku rastie aj výkon. Riešením tohto masívneho oneskorenia je použitie menšieho turbodúchadla s nižšou zotrvačnosťou rotora. Avšak pre dodanie takého množstva vzduchu ako by dodalo väčšie turbodúchadlo, je potrebné, aby sa rotor točil o poznanie rýchlejšie. Otáčky rotora samozrejme nemôžu narastať do nekonečna. Dnešný strop pri konvenčných turbodúchadlách používaných v osobných automobiloch je približne 300 000 otáčok za minútu [9].



Obr. 7 Turbodúchadlo Garrett [10]

Oneskorenie spomínaného motora Formule 1 bolo rádovo v sekundách – približne 6-10 sekúnd. Dnešná technológia posunula túto hodnotu na približne 1 až 3 sekundy, samozrejme pri menších turbodúchadlách. Keďže je táto práca zameraná na elektrickú podporu dúchadiel, je nutné podotknúť, že dnes sa už dá toto oneskorenie turbodúchadla eliminovať viacerými spôsobmi a hlavne rýchlejšie vďaka tejto hybridnej technológii. Napríklad pomocným elektrickým kompresorom alebo elektromotorom upevneným na hriadeľ turbodúchadla, ktorý ho pomáha roztáčať.

3 TURBODÚCHADLÁ S ELEKTRICKOU PODPOROU

V súčasnosti sa dá hovoriť o dvoch hlavných triedach rozdelenia elektrickej podpory turbodúchadiel vo vozidlách. Buď je elektromotor spriahnutý s hriadeľou turbodúchadla priamo, alebo poháňa kompresor umiestnený mimo turbodúchadla. Obe tieto riešenia majú svoje výhody aj nevýhody.

3.1 KOMPRESOR POHÁŇANÝ ELEKTROMOTOROM

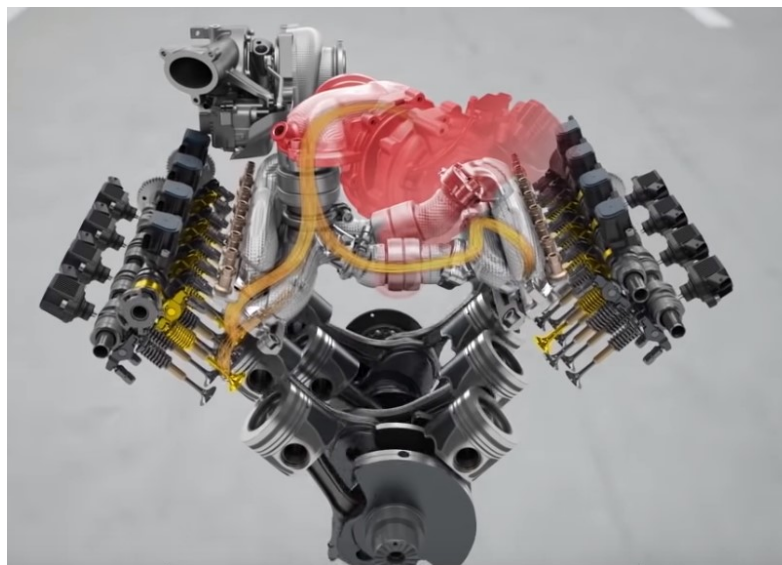
Princíp činnosti je v zásade veľmi podobný klasickému turbodúchadlu až na rozdiel poháňania kompresorového rotora. Kým u klasického turbodúchadla je hriadeľ kompresoru zároveň aj hriadeľou turbínovej časti, ktorú poháňajú výfukové plyny, v elektrokompresore je turbína nahradená samostatným elektromotorom a teda je celé ústrojenstvo umiestnené mimo turbodúchadla. Vďaka tomu nemusí byť kompresor blízko pri motore a tým pádom odolávať tak vysokým teplotám priamo z výfukových plynov alebo od sálavého tepla z motora. Tým pádom nie je nutné dimenzovať súčasti na tak vysoké teploty ako práve u turbodúchadla.

Rotor elektrického kompresoru sa netočí neustále, ale len v prípadoch, kedy je potrebné, aby sa zapájal do procesu stláčania vzduchu keď ešte turbodúchadlo nedokáže samo vyvinúť potrebný plniaci tlak. Tým urýchli roztáčanie klasického turbodúchadla. Hlavnou výhodou elektrického kompresoru je, že sa dokáže roztočiť na svoje maximálne otáčky (do približne $100\,000\text{ min}^{-1}$) za zlomok sekundy. Naopak nevýhodou, že nedokáže nahradiť turbodúchadlo v celom jeho pracovnom rozsahu. Teoreticky by síce mohol, ale potreboval by k tomu elektromotor s veľmi vysokým výkonom, ktorý by musel odniekiaľ vziať energiu na svoj nepretržitý chod. Na základe informácii v kapitole 3.1.1 je možné dedukovať, že túto energiu by samotný spaľovací agregát nevedel dodať. Preto sa kompresor netočí neustále, ale len dopomáha pri roztáčaní turbodúchadla.

3.1.1 SYSTÉM PODPORY TURBODÚCHADLA ELEKTROKOMPRESOROM OD AUDI

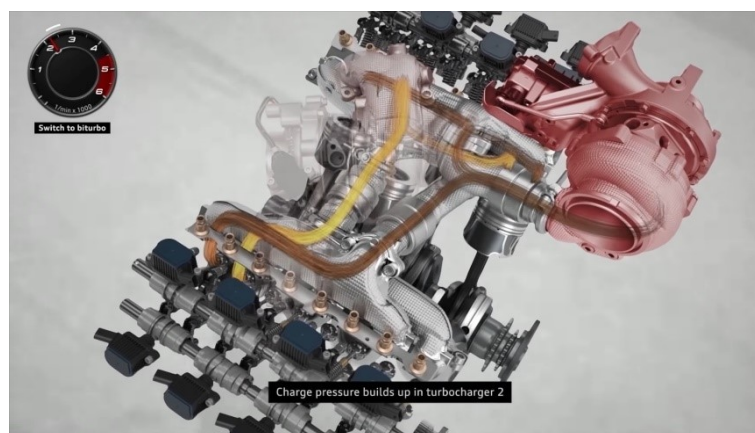
Zmienovaný je reálny systém, dnes používaný v modeloch Audi SQ7. Jedná sa o elektromotorom poháňaný kompresor, ktorý má za úlohu pomáhať agregátu v oblasti nízkych otáčok pri požiadavke na okamžitý vysoký výkon.

Najskôr niečo o konfigurácii daného motora, pre pochopenie podstaty využitia daného zariadenia. Celá zostava nesie názov 4.0litre V8 TDI Biturbo EPC. Nejedná sa teda o dnešné “downsizingové” motory, ale o masívny štvorlitrový agregát produkujúci cca 325kW. Už z označenia vyplýva, že sa jedná o dvoma turbodúchadlami preplňovanú jednotku, ktorá je navyše doplnená o elektrický kompresor (EPC). Ten sám o sebe neslúži na zvyšovanie výkonu motora, ale skôr na lepšiu odozvu plynového pedálu a rýchlejšie budovanie počiatočného tlaku pre prvé turbodúchadlo. Jedná sa o dvojstupňové preplňovanie, kde prvé turbodúchadlo má menší priemer rotora a používa sa samostatne pri nízkych až stredných otáčkach kedy je druhé (väčšie) obchádzané cez ventil a netočí sa. Menšie (aktívne) turbodúchadlo potrebuje na svoje roztočenie menšiu kinetickú energiu z výfukových plynov, preto sa používa ako prvé a zároveň jediné, pokiaľ je motor v nižších otáčkach. Napríklad, ak sa pri relatívne nízkych otáčkach (1500 min^{-1}) stlačí plynový pedál na 100% otvorenia a je teda požadovaný najvyšší možný výkon agregátu, nastane nasledovné: aktívne turbodúchadlo sa začne roztáčať na vyššie otáčky spolu s rastúcimi otáčkami motora a tlaku v turbínovej časti, zatiaľ čo pasívne turbodúchadlo sa netočí a je obchádzané.



Obr.8 Motor Audi SQ7 s jedným činným turbodúchadlom [11]

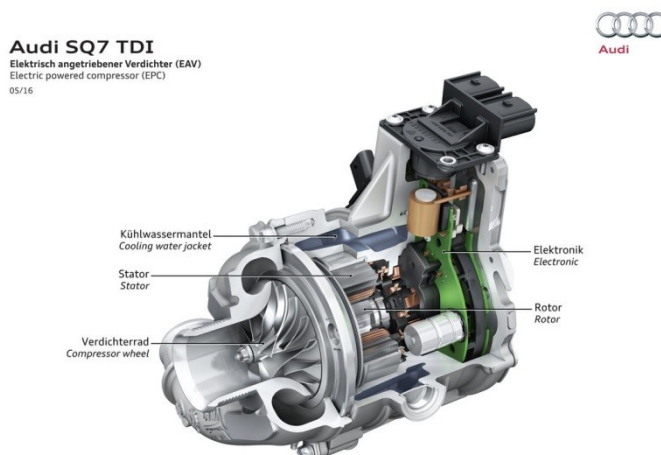
Keď už je tlak výfukových plynov dostatočný, uzavrie sa obtokový ventil pre väčšie (pasívne) turbodúchadlo a začne sa aj to roztáčať, čo znamená ešte vyšší plniaci tlak pre nasávanie zmesi vzduchu do motora. To vyústi v celkový vyšší výkon.



Obr.9 Motor Audi SQ7 s činnými dvoma turbodúchadlami [11]

Doteraz bol predpoklad, že elektrický motor sa nijako nezapájal. Ako už bolo spomenuté, nejde ani o zvýšenie výkonu ako skôr o rýchlejšiu odozvu pri požiadavke vysokého výkonu v oblasti nízkych otáčok. Celkovo tento elektromotor tvorí akési tretie „turbo“, aj keď zmysluplnejším označením je kompresor. Tento elektrický kompresor o celkovom výkone 7 kW sa netočí neustále, ale len pri požiadavke na roztočenie malého turbodúchadla v krátkom čase. Keďže sa rotor tohto elektrického kompresoru dokáže roztočiť z nulových otáčiek na $70\,000\text{min}^{-1}$ za menej ako štvrt' sekundy, dokáže efektívne eliminovať turboefekt. Hneď, ako sa motor roztočí na vyššie otáčky, kde už malé turbodúchadlo dokáže nasáť vyšší tlak ako ponúka elektrokompresor, je kompresor vypnutý a premostený klapkou v nasávacom potrubí. Keďže sa netočí neustále, nemusí sa dimenzovať pri požadovanej

životnosti tak, ako klasické turbodúchadlo, čo samozrejme znižuje jeho výrobnú cenu, ktorá je samozrejme premietnutá vo výslednej cene celého vozidla [12, 13].



Obr. 10 Elektrokompresor Audi SQ7 [14]

Je na mieste položiť si otázku, prečo sa teda takéto elektricky poháňaný kompresor nepoužíva pre budovanie tlaku vo všetkých autách? Príčin je hneď niekoľko. Asi najzásadnejšia je samozrejme cena, no aj fakt, že tento mechanizmus spotrebovávajú veľké množstvo elektrickej energie. V Audi toto vyriešili pridaním 3 kW generátora, ktorý produkuje elektrickú energiu a ukladá ju nie do konvenčnej 12V batérie akú má dnes takmer každé osobné vozidlo, ale do batérie s pracovným napätím 48V. Tá následne dodáva energiu do 7kW kompresoru. Použitie 48V systému je zapríčinené práve vysokým výkonom elektrokompresoru, ktorý tento výkon potrebuje, aby dodal dostatočné množstvo vzduchu do motora. Základ je v jednoduchšej rovnici výkonu:

$$P = U * I \quad [\text{W}]$$

$$P_1 = 48 * 146 = 7008 \text{ W}$$

$$P_2 = 12 * 146 = 1752 \text{ W},$$

kde U = Napätie v obvode [V];

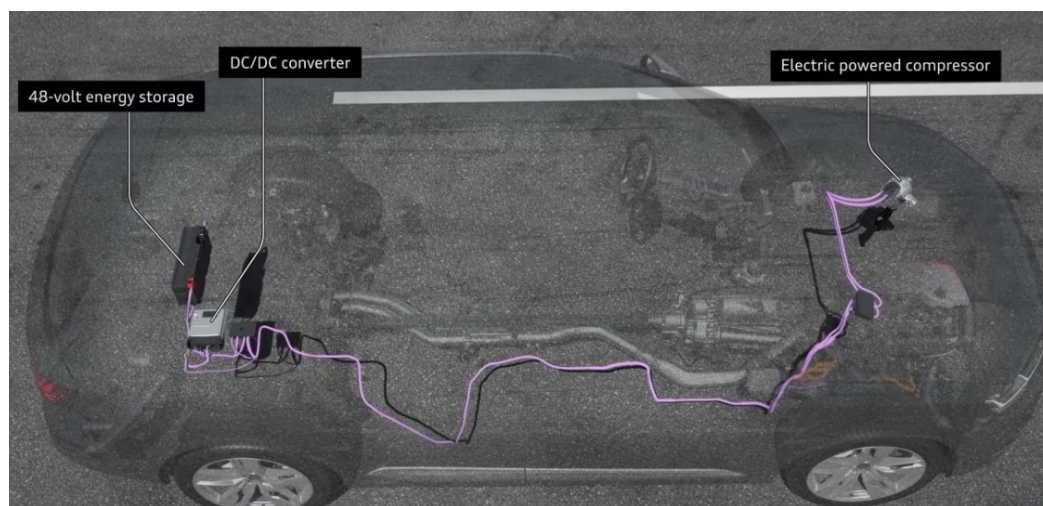
I = Prúd pretekajúci obvodom [A];

P_1 = Výkon pri 48V zapojení;

P_2 = Výkon pri 12V zapojení.

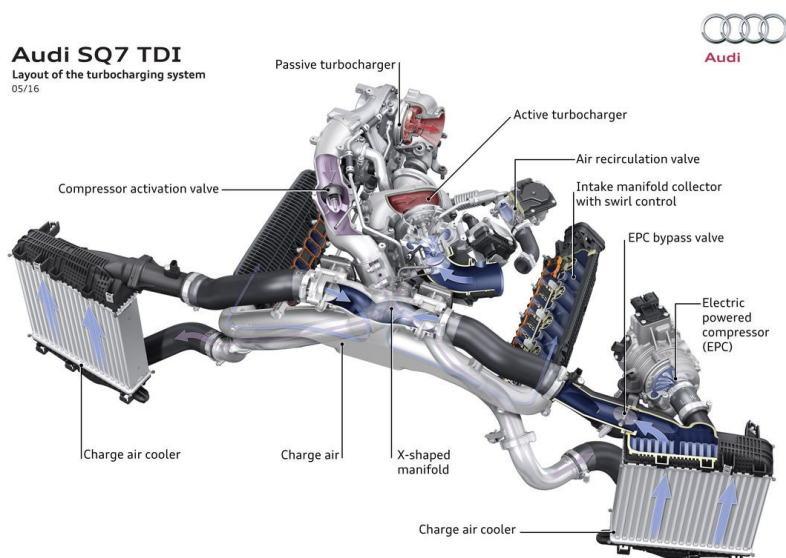
Keby sa použil klasický 12V systém, výkon by nebol dostatočný alebo by sa musel zvýšiť odoberaný prúd z batérie na približne 580A. To by znamenalo dimenzovať káble na oveľa väčší prierez a batéria by musela zniesť tento prúd po dlhší čas. To by nebolo z hľadiska životnosti vôbec prínosné. Prúd, ktorý využíva táto jednotka je približne 146A. To znie ako vysoké číslo, ale treba si uvedomiť, že napríklad pri štartovaní motora je prúd odoberaný z batérie cca 500A, aj keď len na krátku dobu. Taktiež je nutné spomenúť, že batéria nepoháňa len kompresor, ale aj celú elektroniku v aute. Tá je klasicky dimenzovaná na napájanie 12V z konvenčných autobatérií, preto bolo potrebné pridať do systému DC/DC znižovací menič, cez ktorý sú napájané všetky elektrické spotrebiče na palube vozidla [15].

Celkovú účinnosť tohoto systému výrobca verejne neudáva, no v porovnaní s neelektrickou jednotkou tento systém ponúka v rozmedzí 1000-3250 min⁻¹ vyšší výkon o 57kW a točivý moment o 100Nm ako jeho predchodca s porovnateľným agregátom bez elektrickej podpory. Nejde presne o identický agregát, pretože sa používa napríklad iný typ common-railu, takže čísla môžu byť mierne skreslené. Na základe dát z tejto kapitoly je ale možné pripísať určité zvýšenie výkonu a točivého momentu práve elektrickému kompresoru, ktorý pomáha budovať plniaci tlak a tým pádom tento výkon dosiahne motor skôr. Audi udáva, že generátor má účinnosť 80% pri plnom výkone 3kW. Ďalej treba zohľadniť straty vo vedení, straty v jednosmernom meniči, ktorých účinnosti sú medzi 60-90%. Menič síce kompresor neovplyvňuje, pretože má za úlohu dodávať napätie pre elektroniku na palube vozidla, no je to znateľný odber elektrickej energie, ktorú v konečnom dôsledku musí motor vyprodukovať nad rámec spotreby elektrického kompresora a ostatných súčastí. Takisto lítium-iónová 48V batéria nie je ideálnym elektrickým zariadením so 100% účinnosťou, tým pádom po sčítaní všetkých strát je účinnosť celého systému v porovnaní s agregátom vybaveným len klasickými turbodúchadlami približne rovnaká, ak nie aj mierne nižšia [13,16,17].



Obr.11 Rozvodná elektrická sieť Audi SQ7 [14]

Toto riešenie zrýchlenia odozvy turbodúchadla samozrejme nie je lacné, a preto predpoklad že by sa táto technológia dostala v najbližších rokoch aj do áut z nižších cenových kategórií je málo pravdepodobná. Ničmenej sa dá konštatovať, že toto riešenie má svoju budúcnosť, a to hlavne v závodných autách alebo ako platforma na ďalší výskum technológie založenej na podobnom princípe.



Obr.12 Rozloženie komponentov motoru Audi SQ7 [14]

3.1.2 SYSTÉM VOLVO POWER PULSE

System je založený na podobnom princípe ako predošlý spomínaný od spoločnosti Audi. Takisto ide o motor s dvojstupňovým plnením doplnený o elektrický kompresor. Rozdiel prichádza až pri konštrukcii kompresoru a jeho celkovej úlohy v procese preplňovania. Ten totiž nepoháňa priamo menšie z dvoch turbodúchadiel osadených na agregáte, ale stláča a ukladá vzduch do tlakovej nádoby v ktorej udržiava stály tlak.



Obr.13 Detail tlakovej nádrže Volvo Power Pulse [18]

Opäť je možné uviesť situáciu, kedy sa pri voľnobežných otáčkach naplno stlačí plynový pedál a požaduje sa plný výkon. Väčšie turbodúchadlo je obchádzané a netočí sa, menšie sa točí bez podstatného plniaceho účinku. V momente stlačenia plynového pedálu sa

nádrž so stlačeným vzduchom vypustí do výfukového systému pred lopatky turbíny a roztáča menšie z turbodúchadiel. To sa začne točiť rýchlejšie, stúpne nasávací tlak a postupne sa zapája druhé turbodúchadlo. Od tohto momentu sa už systémy nijako nelíšia, rozdiel je len v systéme počiatočného roztáčania menšieho turbodúchadla. Spoločnosť Volvo udáva, že pri voľnoběžných otáčkach motora sa menšie turbodúchadlo pomocou Power Pulse systému dokáže roztočiť na $150\,000\text{ min}^{-1}$ za 0,3 sekundy [19].

Celá zostava spočívajúca z dvojlitrovej tlakovej nádoby, ktorá uchováva tlak 12bar a elektrického kompresoru váži len 10kg. A to je pri váhe vozidla skoro zanedbateľná príťaž, keď na dôvažok poskytuje tento systém skoro okamžitú odozvu turbodúchadla. Navyiac netreba budovať žiadne nové rozvodné siete s vyšším napätím, generátory a napäťové konvertory. Avšak všetko má aj svoje nevýhody a systém od Volva nebude žiadnou výnimkou. Jednou z nich je, že kvôli relatívne malej kapacite tlakovej nádržky sa po vyprázdnení nenaplní okamžite. Výrobca udáva, že nádrž dokáže doručiť dva tlakové “výboje v krátkom čase“. Čo ale znamená krátky čas, nie je presne určené [19]. V praxi to znamená, že keby sa rýchlo pulzovalo pedálom medzi krajnými polohami 0 a 100%, po prvých dvoch plniacich cykloch by už systém nedokázal plniť svoju funkciu okamžite. Ďalšou a ešte väčšou nevýhodou je, že systém funguje iba pri zaradenom prvom a druhom stupni prevodovky a aktivuje sa pri zošliapnutí pedálu na viac ako 36%. Má fungovať primárne ako asistent pre rýchlejšie rozbiehanie a to len do približne 30km/h. Táto technológia sa dnes nachádza u všetkých vozidiel Volvo s označením D5 [19, 20].



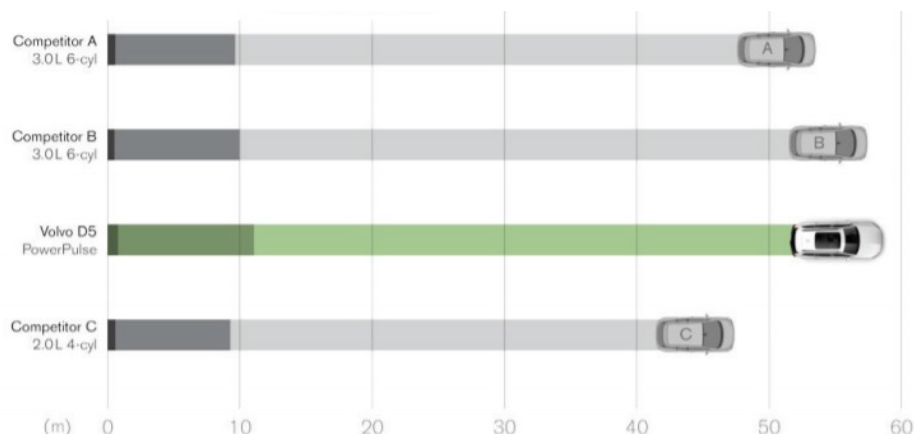
Obr.14 Motor s príslušenstvom a systémom Power pulse [18]

Celá prídavná jednotka teda slúži opäť len na rýchlejšie budovanie tlaku v počiatočných momentoch roztáčania motora. Účinnosť elektrického kompresoru je medzi 70-90%, a nakoľko sa v celom prídavnom systéme nenachádza priveľa súčastí, celková účinnosť bude v porovnaní s klasickým agregátom vyššia, aj keď len o malú hodnotu. Treba ale podotknúť, že len pri rozbehoch vozidla [20]. Akonáhle sa zaradí vyšší ako druhý stupeň prevodovky, jedná sa akoby o nezmenený motor bez akejkoľvek elektrickej podpory. Čo je nepriaznivé napríklad v prípade predbiehania iného vozidla na ceste pri vyššej rýchlosti, pretože sa prejaví nepotlačený turboefekt.

Toto rozhodnutie použitia PowerPulse súvisí s politikou spoločnosti Volvo, ktorá sa zaviazala osadzovať do všetkých svojich nových vozidiel najviac štvorvalcové agregáty do

objemu dvoch litrov, a to aj do vozidiel SUV, až kým neprejdú celoplošne na výrobu čisto elektrických vozidiel.

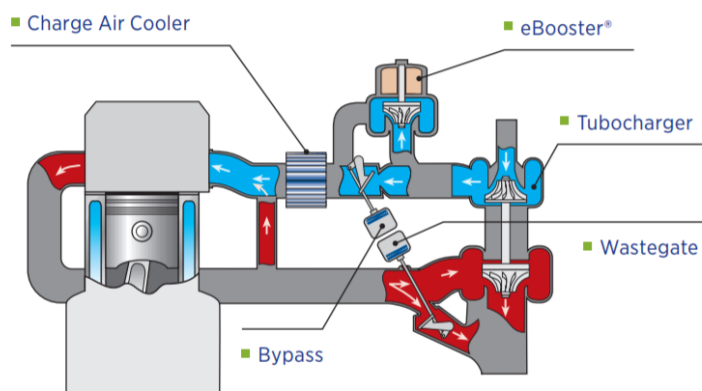
Z Obr.15 je vidieť, že v porovnaní s inými agregátmi s vyšším objemom ako majú vozidlá Volvo so systémom PowerPulse, ich práve táto technológia posúva pred konkurenciu v rýchlosti rozbehu z miesta. Ale len do určitej vzdialenosti – približne 60 metrov (Obr. 15), z dôvodu vyššie spomínaného zapájania systému len v určitých chvíľach.



Obr.15 Porovnanie rozbehu PowerPulse s inými motormi [21]

3.1.3 eBOOSTER

Tento aditívny kit od firmy BorgWarner, ktorý si môže kúpiť ktokoľvek a nechať si ho osadiť na svoje vozidlo je ďalšou sľubnou technológiou, v svojej podstate veľmi podobnou elektrickému kompresoru v Audi SQ7.



Obr.16 Schéma umiestnenia elektrického kompresoru [22]

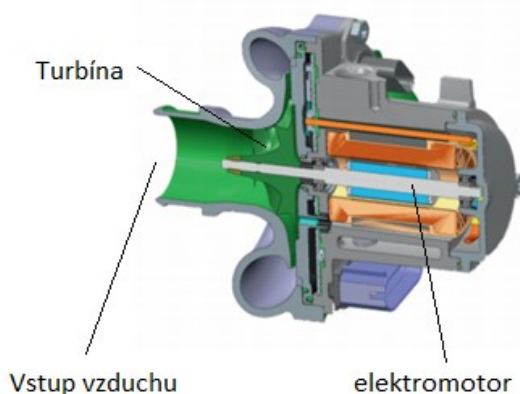
Existuje viacero variant, či už je to práve systém s 48V pracovným napätím, ktorý musí byť separátne osadený vo vozidle pre pohon elektrického kompresoru, alebo klasický 12V systém. Ako už bolo spomenuté, vyššia voltáž má potenciál dodania energie pre viac výkonné kompresory. V prípade použitia nižšieho operačného napätia sa dodáva elektrokompresor s výkonom 2kW, ktorý v konečnom dôsledku zlepšuje spotrebu motora

o približne 4%. Toto číslo vychádza z vyššieho tlaku pri použití eBooster-u, vďaka čomu môže byť použité väčšie množstvo nízkeho tlaku z EGR pri vznetrových motoroch. Celkovo môžu vyprodukované emisie klesnúť o 5% oproti konceptu bez elektrickej podpory, aj keď NOx emisie sú o málo vyššie. Zariadenie ako také je kompaktné, s rozmermi 170mm na dĺžku a 135mm priemer pri 48V konfigurácii [23].

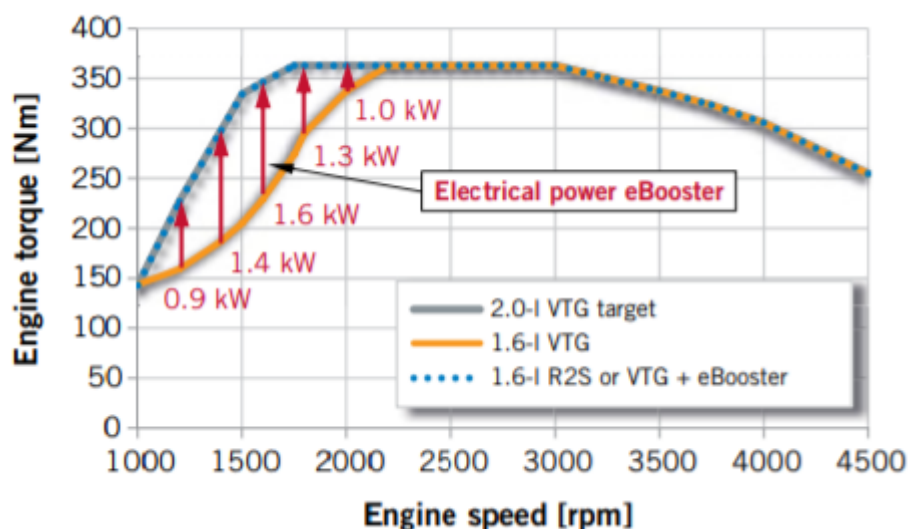
Z Obr.17 je vidieť, že roztočenie z voľnobežných otáčok kompresoru (6000 min^{-1}) na 90% maximálnych otáčok je už za štvrt' sekundy, u 48V systému dokonca o 20ms rýchlejšie. Používaný je v oboch prípadoch jednosmerný elektromotor s permanentným magnetom bez kief, ktorý má vyššiu účinnosť oproti asynchrónnemu či spínaciemu reluktančnému motoru. Takisto musí byť motor odolný voči tepelným vplyvom od motora, preto boli ako permanentné magnety použité samárium-kobaltové magnety, ktoré sú druhými najsilnejšími, hneď po neodymových [12, 23].

| Specification | 12-V eBooster | 48-V eBooster |
|--|-------------------------------|-----------------------------|
| Max. current [A] | 200 | 130 |
| Built-up to 90 % rated engine speed [ms] | 250 | 230 |
| Max. power output [kW] | 2.4 (transient) 1.7 (nominal) | 6.2 (transient) 5 (nominal) |
| Rated engine speed [rpm] | 60,000 | 70,000 |
| Pressure ratio [-] | 1.3 | 1.45 |
| Air flow [kg/h] | 150 | 300 |
| Switch-on time over lifetime | Appr. 50 % at rated power | Appr. 33 % at rated power |
| Max. time boost-event [s] | 12 | 14 |
| Max. on-time | 60 to 80 % | 60 to 80 % |

Obr.17 Porovnanie špecifikácií 12V a 48V konfigurácií eBooster [12]



Obr.18 Rez elektrickým kompresorom eBooster [22]



Obr.19 Porovnanie točivého momentu [22]

Technológia od tejto firmy bola použitá pri koncepte Audi RS5 TDI ktorého pohonná jednotka je 3.0l V6 vznetrový motor s dvojstupňovými turbodúchadlami doplnený práve o tento typ elektrickej podpory. Motor produkuje 283kW, no čo je zaujímavejšie, hodnota krútiaceho momentu je závratných 750Nm a to už od 1250 min⁻¹. V porovnaní s bežným 3.0TDI Biturbo je to o 53kW a 100Nm viac a o 200 otáčok skôr. Pracuje sa tu s 48V sústavou, ktorá sa snaží využívať čo najviac energie z rekuperácie pochádzajúcej z brzd. Elektromotor má výkon 7kW a pomáha rozšľachovať turbodúchadlá kým má motor pod 3000 min⁻¹ a neprodukujú ešte dostatočný tlak nasávaného vzduchu. Elektromotor je pritom dostatočne ďaleko od horúcich častí motora a teda nepotrebuje medzichladič. Celá prídavná sústava má približne 20 kilogramov. Viac ako úctyhodná je aj spotreba 5,3l/100km. Len pre porovnanie, benzínová verzia Audi RS5 potrebuje skoro dvojnásobné množstvo benzínu na prejdienie rovnakej vzdialenosti [23,24,25].



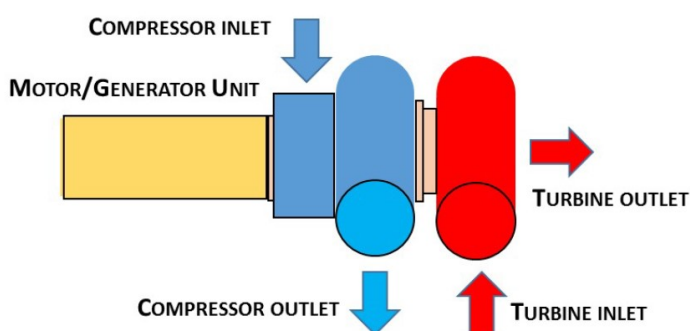
Obr.20 Audi RS5[26]

Dá sa len predpokladať, že technológia nájde uplatnenie v širšom spektre vozidiel v dostupných cenových kategóriách. Aj keď je jasné, že nebude mať také hodnoty ako napríklad v RS5 TDI, pretože tu sa jednalo len o koncept a ukázanie čoho je táto technológia schopná. Pre bežné použitie určite nebudú hodnoty zlepšenia oproti bežným motorom tak

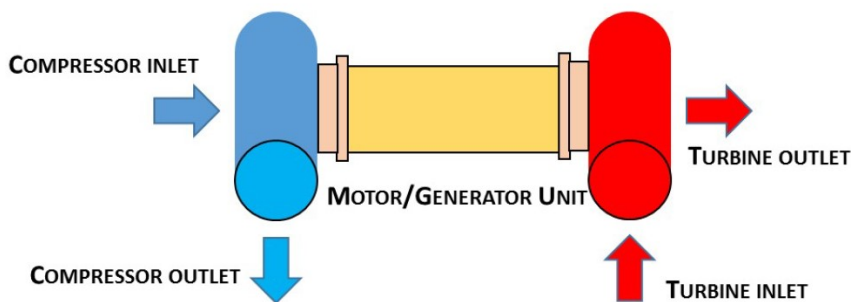
veľké, či už kvôli životnosti dielov alebo cene. Je zrejmé, že účinnosť vzťahnutá práve na spotrebu paliva je pri daných parametroch viac než zaujímavá, a to aj v porovnaní s bežnými vozidlami, ktoré jazdia po európskych cestách ale majú podstatne nižšie parametre výkonu a točivého momentu. Audi týmto ukazuje okrem iného aj to, že downsizing nemusí byť jediná cesta pre splnenie čoraz prísnejších noriem a nariadení, ktoré sa týkajú ekonomickej a ekologickej prevádzky vozidiel.

3.2 ELEKTROMOTOR OSADENÝ V TURBODÚCHADLE

Ako názov napovedá, pri tejto technológii je turbodúchadlo doplnené o pomocnú elektrickú jednotku priamo v svojej konštrukcii. Existujú dva typy osadenia elektromotora – medzi kompresorovou a turbínovou časťou v tele turbodúchadla alebo z vonkajšej strany kompresoru.



Obr.21 Turbodúchadlo s elektrickou jednotkou na strane kompresoru [27]

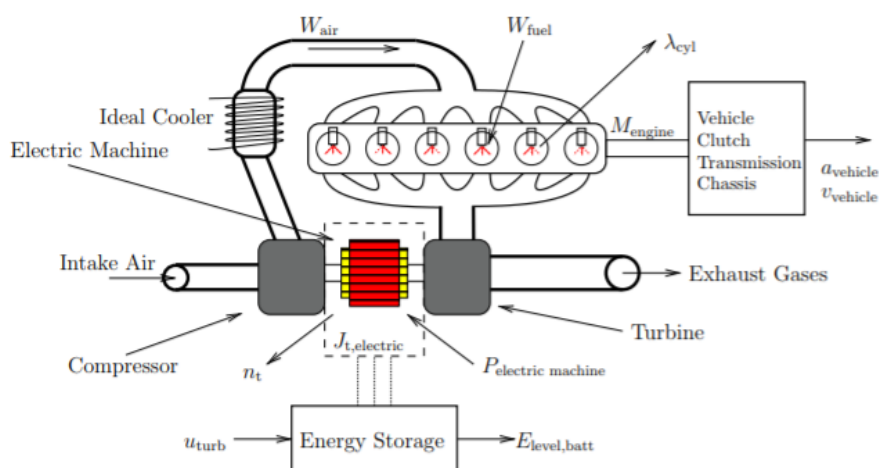


Obr.22 Schéma turbodúchadla s elektrickou jednotkou uprostred [27]

Pri oboch konfiguráciách je elektrická jednotka (zväčša asynchrónny motor) výrazne namáhaná vysokou teplotou a vibráciami od samotného turbodúchadla, preto musí byť konštrukcia a použité materiály uspokojené na tieto skutočnosti. V prípade elektrickej jednotky medzi kompresorovou a turbínovou časťou je toto namáhanie samozrejme väčšie, nakoľko susedná turbínová časť môže dosahovať teploty aj nad 1000°C. Toto namáhanie sa odzrkadlí v cene komponentov, z ktorých musí byť elektromotor vyrobený. Preto je jasné, že táto technológia sa len tak rýchlo nedostane do bežných sériových vozidiel. Naopak, využitie je v závodných vozidlách ako napríklad Formula 1, kde parametre a výhody, ktoré toto uloženie ponúka, môžu prevýšiť ekonomickú stránku veci.

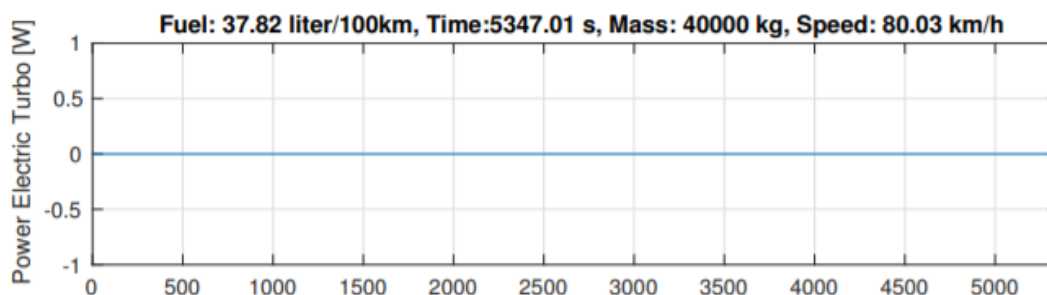
Hlavnou výhodou elektromotoru je, že sa dá prevádzkovať v motorickom, ale aj generátorickom režime. To znamená, že v nízkych otáčkach spaľovacieho motora pomáha rozotáčať rotor turbodúchadla a naopak pri roztočenom turbodúchadle môže elektromotor dostatočne generovať elektrickú energiu a ukladať ju do batérie pre ďalšie použitie, keď si to situácia vyžiada. Taktiež môže vo vysokých otáčkach brzdiť chod turbodúchadla a nahradzovať tak regulátor tlaku (wastegate).

Štúdia (*Ekberg a kol.*)[28], ktorá bola zameraná na experimentálne zistenie prínosu použitia elektrického motora v turbodúchadle pri jazde kamióna ukazuje, že je toto zariadenie schopné byť namontované aj na väčšie motory. Pri tomto konkrétnom výskume je nutné podotknúť, že test bol robený v reálnych podmienkach na cestách vo Švédsku, nie pri optimálnych podmienkach v laboratóriu, takže na výsledkoch sú zohľadnené všetky vonkajšie vplyvy aké môžu nastať pri normálnej jazde vozidla. Vznetový motor v ťahači preplňovaný turbodúchadlom bol teda doplnený o elektrickú jednotku osadenú na hriadelí medzi turbínou a kompresorom.

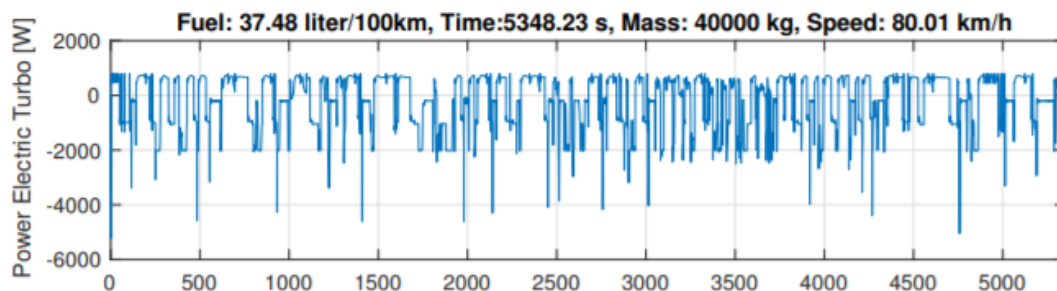


Obr.23 Ilustračná schéma umiestnenia elektromotora [28]

Celková účinnosť elektrickej jednotky bola spočítaná na 80% pri zarátaní všetkých strát na elektrickom motore, napäťovom meniči a chemicko-elektrickej premene energie v batérii [28].

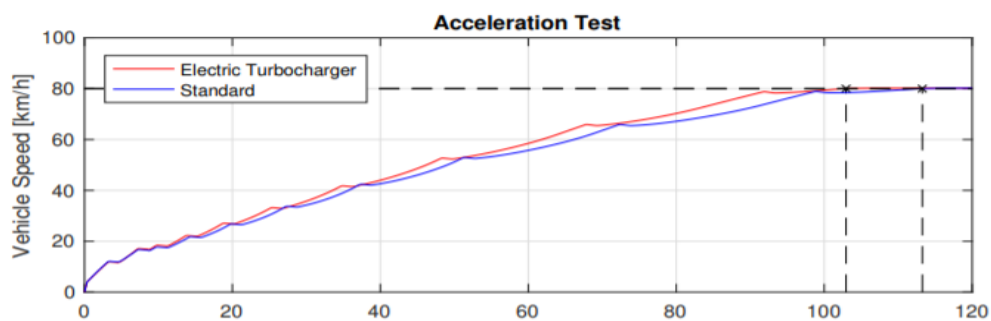


Obr. 24 Graf hodnôt výkonu a referenčné hodnoty pri vypnutej elektrickej podpore [29]

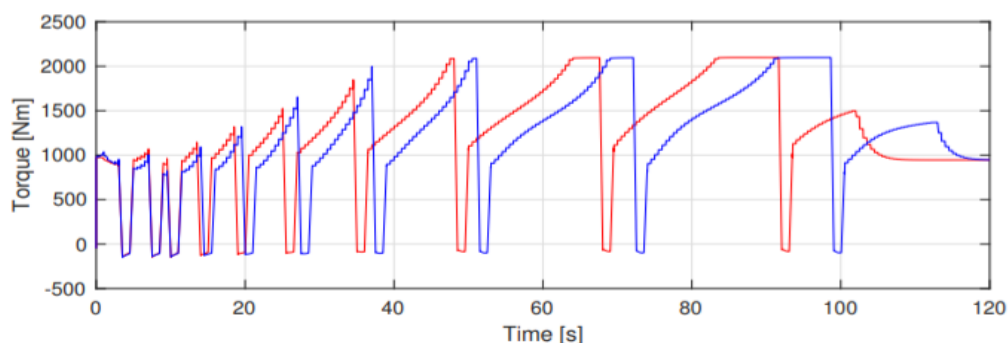


Obr.25 Grafické znázornenie výkonu pri zapájaní elektrickej jednotky [29]

Z grafov na Obr.24,25 je vidieť, že pri zapájaní elektrického pohonu turbodúchadla klesla spotreba z 37,82l na 37,48litrov na 100km, čo je úspora približne 0,9%. Otázkou ostáva, či je táto hodnota dostatočujúca pri prepočte ušetrených nákladov na pohonné hmoty vzhľadom na cenu a montáž nového elektrického turbodúchadla a s ním spojených zariadení [29].



Obr.26 Grafická závislosť rýchlosti na vzdialenosti [29]



Obr.27 Grafická závislosť točivého momentu na čase[29]

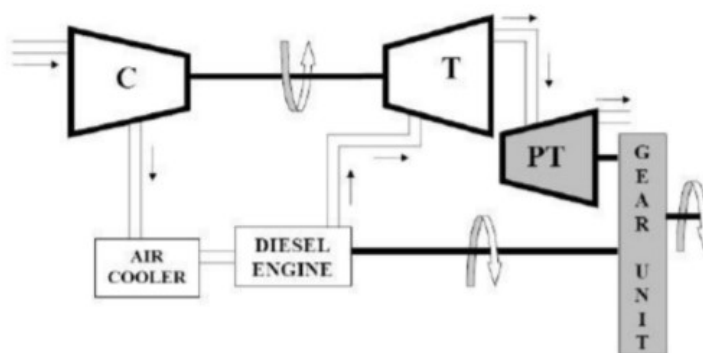
Z Obr.26,27 je možné si všimnúť, ako elektrická jednotka pomáha urýchľovať odozvu motora, hlavne nástup vyššieho točivého momentu pri rozbiehaní, respektíve pri každom preradení prevodovky. Nejde pritom ani tak o zmenu výstupných hodnôt motora, ako skôr posúvanie kriviek v grafe smerom k počiatku, t.j. skorší rast hodnôt.

3.3 TURBO COMPOUNDING

Technológia nesúca tento názov sa objavila už pred pár rokmi vo vozidlách Formule 1. Ide o zber energie z výfukových spalín, inak povedané o rekuperáciu. Rozdeľuje sa na dva hlavné typy:

- mechanickú rekuperáciu;
- elektrickú rekuperáciu.

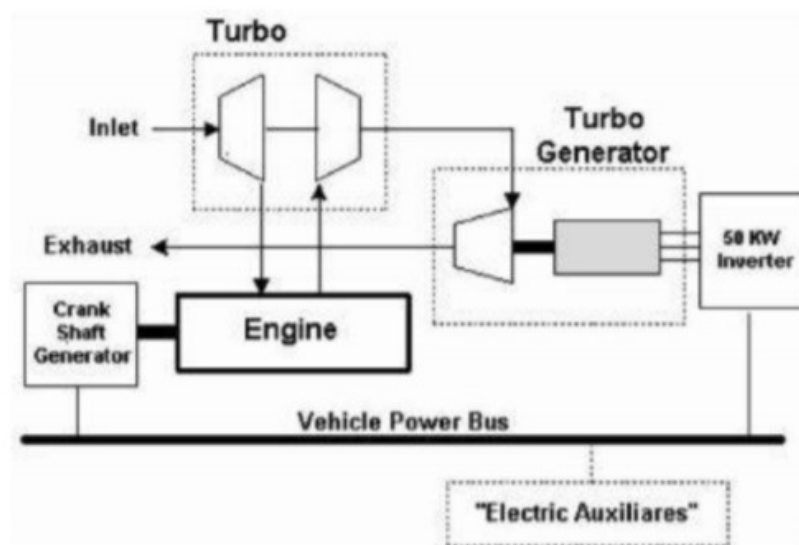
Prvá spomínaná prenáša energiu mechanicky späť do motora. Najčastejšie ide o prenos z hnanej turbíny cez hriadeľ a následne prevodovú skriňu na kľukový hriadeľ motora.



Obr.28 Schéma mechanickej rekuperácie [30]

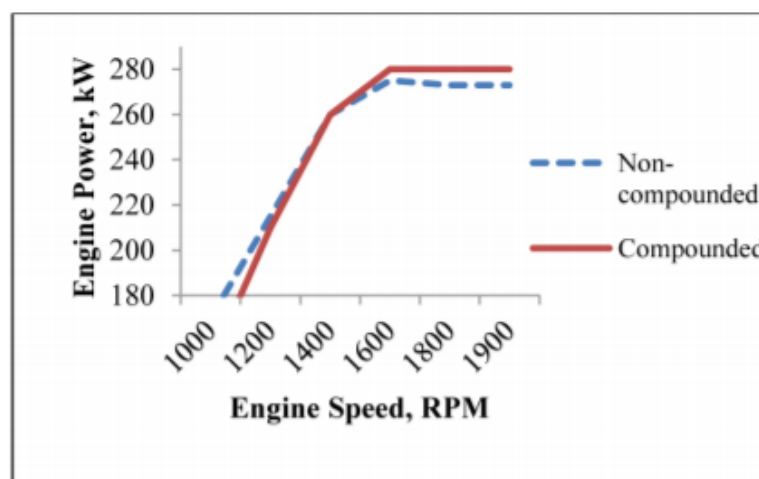
Štúdia (Hountalas a kol.) [29] ukazuje že pridaním hnanej turbíny (PT) do výfukového systému môžeme využiť až do 20% inak nevyužitej energie obsiahnutej vo výfukových plynach – čo sa rovná približne 5% celkovej energie paliva. Toto využitie ale nesie so sebou aj nevýhody, a to hlavne cenu a životnosť použitých súčastí, preto sa táto technológia využíva len obmedzene a v aplikáciách, kde nájde väčšie opodstatnenie [29].

Druhý typ rekuperácie je v princípe podobný mechanickému z hľadiska tvorby energie. Rozdiel nastáva v jej prenášaní. Na pridanú hnanú turbínu je napojený generátor, ktorý produkuje elektrickú energiu. Tu sa prejaví väčšie spektrum využiteľnosti tejto energie v porovnaní s mechanickou rekuperáciou – môžeme ju uskladňovať napríklad do batérie pre neskoršie využitie, alebo pre priame napájanie spotrebičov, prípadne poháňanie kompresoru a pod. Pre turbodúchadlá s relatívne vysokou účinnosťou je podľa simulácií možné dosiahnuť 8-9% úsporu paliva s použitím elektrickej rekuperácie [30].



Obr. 29 Ilustračná schéma elektrickej rekuperácie [30]

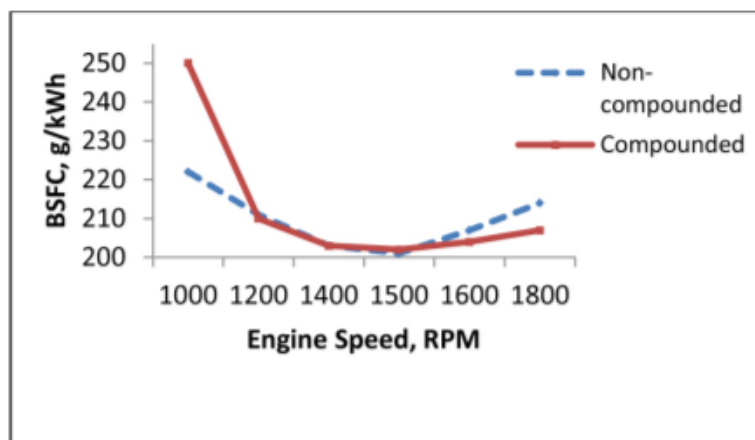
Rekuperáciou energie z turbodúchadla je možné obnoviť a znova využiť približne 11,4% energie výfukových plynov, alebo zvýšiť výkon motora o približne 3,7kW [30]. Je jasné, že pridaním turbíny do výfukového potrubia sa zväčší kladený odpor pre prúdiace plyny, čo negatívne ovplyvňuje motor v nízkych otáčkach. Z grafu na obr. 30 je vidieť, že do približne 1400 min⁻¹ je výkon motora s prídavnou turbínou nižší, ako u motora bez tejto súčasti, a to v priemere o 4,7%, čoho príčinou je práve pridaný odpor od turbíny. Naopak pri vyšších otáčkach je zvýšenie výkonu motora s rekuperáciou vyšší priemerne o 2,3% a maximálne o 7% [30].



Obr.30 Graf porovnania výkonu s a bez rekuperácie [30]

Pokiaľ sa jedná o účinnosť premietnutú do spotreby paliva – pretože to je informácia, ktorá v dnešnom svete najviac hýbe marketingom u automobiliek – tak opäť z nameraných hodnôt zaznačených do grafu na Obr.31 je vidieť, ako v oblasti otáčiek 1000 min⁻¹ je BSFC (brake specific fuel consumption) vyššia u rekuperovaného motora o 12,6%. Hlavná príčina je už spomenutý spätný tlak pôsobiaci od turbíny. Pri 1200-1400 min⁻¹ je BSFC približne rovnaká

pri oboch meraniach. Maximálna redukcia potrebného dodaného paliva o 3,3% pri rekuperácii je dosiahnutá pri 1800 min^{-1} [30].



Obr.31 Graf znázorňujúci spotrebu paliva s a bez rekuperačného člena [30]

ZÁVER

Automobil ako taký nevymrie. Aspoň nie najbližších pár rokov. Aj preto je možné povedať, že investícia do nových technológií v tejto oblasti rozhodne nie je zbytočná. Pohon a iné veci, ktoré však obsahuje, sú už otázkou hlbšieho zamyslenia. Obrovský vplyv na vývoj nových motorov majú čoraz prísnejšie normy, ktoré musí každé nové vozidlo spĺňať. Či už sa jedná o emisné, bezpečnostné alebo iné. Chtiac či nechtiac sa musí automobilka prispôbiť, inak jej nebude dovolené vozidlá nespĺňajúce príslušné normy predávať na trhu. Aj preto sa táto práca zaoberala hybridnými pohonmi turbodúchadiel pri rôznych koncepciách ich použitia. Ide však o zatiaľ pomerne novú technológiu, ktorá je stále v štádiu výskumov a testovaní. Z rôznych meraní a experimentov je však možné vidieť, že celkové zlepšenie účinnosti je dosť sporné a je na mieste položiť si otázku, či to stojí za zvýšenú cenu celého turbodúchadla prípadne celej zostavy na motore. Väčšie využitie je skôr len v závodných autách kde sa každý jeden kW naviac počíta a môže znamenať rozdiel medzi víťazom a porazeným. V bežnom živote pri sériových vozidlách je to síce pekný marketingový artikel pre predajcu, no pre spotrebiteľa skôr výrazne nepovšimnuteľná záležitosť, najmä pri dennej prevádzke. V nízkej a strednej cenovej triede nových vozidiel sa táto technológia aj tak zatiaľ nevyskytuje vo väčšom počte a predpoklad, že by sa to v horizonte piatich rokov výrazne zmenilo sa nedá predpokladať so skoro žiadnou istotou. Tieto technológie sú zatiaľ čo sa týka osobných a úžitkových vozidiel len v začiatkoch a stále len v malom množstve sériovo vyrábaných vozidiel. Je predpoklad, že táto technológia pomôže spaľovacím motorom k túženým nižším emisiám a nižšej spotrebe. Otázne je, ako moc nižšej spotrebe a s tým súvisiace na ako dlhú dobu trvania, kým príde masívnejší nástup elektromobilov. Pretože budúcnosť pohonov jednoznačne patrí čisto elektrickej energii. Aj preto, že sa v posledných rokoch čoraz častejšie diskutovanou témou stáva globálne otepľovanie a vypúšťanie prílišného množstva škodlivín do ovzdušia či emisná stopa, ktorú vozidlá zanechávajú. Len v Európe prichádzajú do platnosti každých pár rokov nové emisné normy EURO, na ktoré musia automobilky veľmi pružne reagovať. Netreba sa ale nechať zmiasť tým, že elektromobil je jediná a tá najlepšia budúcnosť. Áno, elektrické auto má skutočne nulové emisie a spotrebu premietnutú do nákladov neporovnateľne nižšiu ako spaľovacie motory, no netreba zabúdať na niekoľko podstatných faktorov. A síce, len napríklad v Česku za rok 2013 pochádzalo viac ako 40% vyrobenej elektrickej energie zo spaľovania uhlia, čo rozhodne nepatrí k najekologickejším spôsobom [31]. Ďalej treba myslieť aj na to, že výroba batérii do elektrických áut tiež nie je zrovna ekologicky prívetivý proces. Naopak, výroba klasického auta so spaľovacím motorom je ekologickejšia. Obrat vo vyprodukovaných škodlivinách na jedno vozidlo prichádza až po určitej dobe používania vozidla konečným spotrebiteľom, a aj to odhadom až po niekoľkých rokoch, v závislosti hlavne na veľkosti použitej batérie [32]. Aj keď elektrický pohon má oveľa lepšie predispozície byť masovo využívaný, hlavne pre svoju účinnosť a okamžitý nástup výkonu, ďalej rozmery motora či umiestnenie napríklad v kolese pre lepšie rozloženie váhy a úsporu miesta, je veľkou nevýhodou práve batéria. Sieť nabíjacích staníc na elektromobily je stále len na začiatku a nie je dostačujúca. No hlavne, každý je zvyknutý prejsť na aute 500-600 kilometrov, dve minúty tankovať a vyraziť znova na podobne dlhú vzdialenosť. Čakať 8-12 hodín na nabíjanie vozidla ktoré s ťažkosťami prejde 400 kilometrov je tak pre mnohých odradzujúce. Nehovoriac o tom, že batéria má obmedzenú životnosť na pár rokov, kdežto skoro všade sa dá nájsť 15-20 ročné vozidlo so spaľovacím motorom ktorý má za sebou 300-400 tisíc kilometrov a ktovie koľko ešte pred sebou.

Preto je nateraz cesta postupnej elektrifikácie najschodnejšiou cestou. Cena nie je taká skoková ako pri kúpe nového elektromobilu a spotrebiteľ si môže užívať výhody z oboch odvetví. Elektromobilita je jednoznačne technológiou blízkej budúcnosti, kedy klasické spaľovacie motory jednoducho vymiznú. Nebude to ale náhle, a preto toto hybridné využívanie oboch technológií naraz je akýmsi prechodným obdobím, kým sa nezdokonalia technológie a nestanú sa dostupnejšie pre všetkých.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] DUSIL, Tomáš. Seriál turbodmychadla. První díl: Co nevíte o turbech? Dříve výkon, dnes spíše efektivita. *Auto.cz* [online]. 4.10.2015 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/serial-turbodmychadla-prvni-dil-co-nevite-o-turbech-drive-vykon-dnes-spise-efektivita-89430>
- [2] *Celebrating 110 years of turbocharging* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://new.abb.com/turbocharging/110-years-of-turbocharging>
- [3] HISTORY OF TURBOCHARGING. *Turbosmart* [online]. 2011, 19.9.2011 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.turbosmart.com/news/history-of-turbocharging/>
- [4] *Teorie turbodmychadel* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.flexamiauto.cz/teorie/>
- [5] *Turbochargers* - [online]. 2017 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: http://www.epi-eng.com/piston_engine_technology/turbocharger_technology.html
- [6] KATSANOS, C.O., D.T. HOUNTALAS a T.C. ZANNIS. Energy Conversion and Management: Simulation of a heavy-duty diesel engine with electrical turbocompounding system using operating charts for turbocharger components and power turbine. *Volume 76* [online]. , 2013(76), 712-724 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.022>
- [7] *Compressor Maps* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.enggyclopedia.com/2012/01/compressor-maps/>
- [8] K.MILLER, Jay a George MATLY, THOMPSON, Travis, ed. *Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems*. 2008. 2008. ISBN 978-1-932494-29-7.
- [9] DUSIL, Tomáš. Turboefekt: Co to vlastně je? A jak s ním bojovat?. *Auto.cz* [online]. 2017, 13.3.2017 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/turboefekt-co-to-vlastne-je-a-jak-s-nim-bojovat-104357>
- [10] Vedeli ste načo slúži turbo v aute a ako funguje?. *Fit-drive.sk* [online]. 24.11.2017 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://fit-drive.sk/vedeli-ste-naco-sluzi-turbo-v-aute-ako-funguje/>
- [11] GommeBlog.it: Car & Performance. Audi SQ7 TDI - Animation EPC and 48-volt electrical Subsystem. *Youtube* [online]. 2016 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=sHZjo0e5aGg>

- [12] SPINNER, Gerd, Sascha WEISKE, Stefan MÜNZ. BorgWarner's eBooster® - the new generation of electric assisted boostin s. [cit. 2019-04-13].
- [13] KABLE, Greg. Electric Turbo, 48V Electrics Onboard New Audi SQ7. *WardsAuto* [online]. 2016, 3.3.2016 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.wardsauto.com/engines/electric-turbo-48v-electrics-onboard-new-audi-sq7>
- [14] Audi SQ7 TDI: Layout of the turbocharging system. *Audi MediaCenter* [online]. 2016, 5.2.2016 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/photos/detail/audi-sq7-tdi-31282>
- [15] Electric Superchargers - How Audi Is Eliminating Turbo Lag. *Youtube: EngineeringExplained* [online]. 11.3.2018 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=k8-_UrfbRBA&t=120s
- [16] Source Resistance: The Efficiency Killer in DC-DC Converter Circuits. *Maxim Integrated* [online]. 2004 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3166>
- [17] GANZ, Andrew. New diesel Audi SQ7: Electric turbo, 48-volt electrics aid efficiency. *Greencarreports* [online]. 8.3.2016 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.greencarreports.com/news/1102717_new-diesel-audi-sq7-electric-turbo-48-volt-electrics-aid-efficiency
- [18] Volvo Cars PowerPulse animation. *Youtube* [online]. 2017 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=BOM7-7iulGA>
- [19] Pulsating technology: Volvo's Drive-E D5 twin-turbo diesel engine features an ingenious anti-lag system called PowerPulse. *Volvocars* [online]. 7.2.2017 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/au/about/australia/i-roll-enewsletter/2017/february/pulsating-technology>
- [20] TEKNÖS, Oliver. Power Pulse od Volva funguje len do rýchlosti 30 km/h. *Topspeed.sk* [online]. 19.12.2016 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.topspeed.sk/power-pulse-od-volva-funguje-len-do-rychlosti-30-km/h/11658>
- [21] JAN, Sajdl. PowerPulse. *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/powerpulse/>
- [22] EBooster® – electrically driven compressor. *Borgwarner.com* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/ebooster-electrically-driven-compressor-product-sheet.pdf?sfvrsn=9dbccf3c_14

- [23] TAYLOR, Michael. Audi RS5 TDI Concept review. *Whichcar* [online]. 2015 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.whichcar.com.au/reviews/audi-rs5-tdi-concept-review>
- [24] ANDREJČÁK, Tomáš. Audi RS5 TDI Concept: Superdiesel dostal elektrické turbo. *Auto.Pravda* [online]. 2014, 25.06.2014 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://auto.pravda.sk/novinky/clanok/321786-audi-rs5-tdi-concept-superdiesel-dostal-elektricke-turboduchadlo/>
- [25] KEYNES, Lee. BORGWARNER EBOOSTER: SUPPLEMENT FOR TURBOCHARGERS. *Motorverso.com* [online]. 1.6.2018 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.motorverso.com/borgwarner-ebooster/>
- [26] GEIGER, Thomas. AUDI RS5 TDI: Tschüs zum Turboloch! In: *Autobild.de* [online]. 2014-05-28 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.autobild.de/artikel/audi-rs-5-tdi-concept-vorstellung-5135710.html>
- [27] BORETTI, Albert. *F1 style MGU-H applied to the turbocharger of a gasoline hybrid electric passenger car* [online]. [cit. 2019-04-13]. DOI: <https://doi.org/10.1515/nleng-2016-0069>. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/j/nleng.2017.6.issue-4/nleng-2016-0069/nleng-2016-0069.xml>
- [28] EKBERG, Kristoffer a Lars ERIKSSON. Improving Fuel Economy and Acceleration by Electric Turbocharger Control for Heavy Duty Long Haulage. *IFAC PapersOnLine* [online]. 2017, 2017(Volume 50, 1), 11052-11057 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2486>
- [29] HOUNTALAS, D.T., C.O. KATSANOS a V.T. LAMARIS. Recovering Energy from the Diesel Engine Exhaust Using Mechanical and Electrical Turbocompounding. *SAE Technical Papers* [online]. 2007, 2007-04-16, 2007(01-1563), - [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.4271/2007-01-1563. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2007-01-1563/>
- [30] TEO SHENG JYE, Aaron Edward, Apostolos PESIRIDIS a Srithar RAJOO. Effects of Mechanical Turbo Compounding on a Turbocharged Diesel Engine. *SAE Technical Papers* [online]. 2013, 2013-03-25, 2013(3), - [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.4271/2013-01-0103. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2013-01-0103/>
- [31] ZILVAR, Jiří. *Výroba a spotřeba elektřiny v ČR v roce 2017* [online]. 24.6.2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/17553-vyroba-a-spotreba-elektriny-v-cr-v-roce-2017>

- [32] *Are Electric Cars Worse For The Environment? Myth Busted* [online]. 2018, 31.10.2018 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6RhtiPefVzM&t=409s>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

| | |
|------|--|
| BSFC | Merná spotreba paliva |
| EGR | Regulácia výfukových plynov |
| EPC | Elektricky poháňaný kompresor |
| PT | Hnaná turbína |
| TDI | Motor s priamym vstrekom paliva preplňovaný turbodúchadlom |